



(19)
 Bundesrepublik Deutschland
 Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2005 046 454 B3** 2007.04.19

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2005 046 454.8**
 (22) Anmeldetag: **23.09.2005**
 (43) Offenlegungstag: –
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **19.04.2007**

(51) Int Cl.⁸: **G01R 33/035** (2006.01)
H01L 39/22 (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 2 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
**Institut für Physikalische Hochtechnologie e.V.,
 07745 Jena, DE; Supracon AG, 07745 Jena, DE**

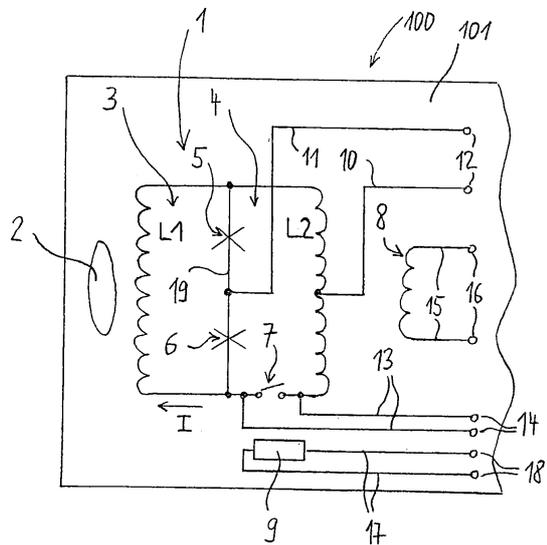
(74) Vertreter:
**Patent- und Rechtsanwaltskanzlei Bock Bieber
 Donath Partnerschaftsgesellschaft, 07745 Jena**

(72) Erfinder:
**Meyer, Hans-Georg, Dr., 07749 Jena, DE; Stolz,
 Ronny, 99510 Apolda, DE; Zakosarenko,
 Viatcheslav, 07747 Jena, DE; Meyer, Matthias,
 07749 Jena, DE; Rösel, Winfried, 07749 Jena, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
 gezogene Druckschriften:
US 53 43 147 A
US 45 88 947 A

(54) Bezeichnung: **SQUID-Anordnung und Verfahren zum Messen einer Änderung eines Magnetfeldes sowie Verwendung der SQUID-Anordnung und des Verfahrens**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine SQUID-Anordnung zum Messen einer Änderung eines Magnetfeldes mit einem Gleichstrom-SQUID (1), wobei die Änderung des Magnetfeldes durch eine Probe (2) hervorgerufen wird, welche in einem Magnetisierungsfeld angeordnet ist. Um eine konstruktiv einfache Lösung anzugeben, bei der zugleich auch die Verluste des magnetischen Flusses minimiert sind, ist es vorgesehen, dass der SQUID (1) selbst zum Erzeugen des Magnetisierungsfeldes ausgebildet ist.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine SQUID-Anordnung zum Messen einer Änderung eines Magnetfeldes mit einem Gleichstrom-SQUID, wobei die Änderung des Magnetfeldes durch eine Probe hervorgerufen wird, welche in einem Magnetisierungsfeld angeordnet ist. Darüber hinaus betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Messen einer solchen Änderung. Schließlich betrifft die Erfindung die Verwendung einer solchen SQUID-Anordnung bzw. eines solchen Verfahrens für verschiedene Anwendungszwecke.

Stand der Technik

[0002] Soll die Änderung der Magnetisierung einer Probe gemessen werden, muß sich diese Probe dazu in einem konstanten Magnetfeld, dem sogenannten Erregerfeld oder Magnetisierungsfeld, befinden. Eine Änderung der Magnetisierung der Probe läßt sich dann als Änderung des Magnetfeldes detektieren. Eine derartige Änderung des Magnetfeldes in der Umgebung der Probe kann durch einen supraleitenden Quanteninterferenzdetektor (SQUID) gemessen werden. Dabei ist der SQUID entweder über einen Flußtransformator an die Probe angekoppelt. Jedoch überträgt der Flußtransformator nur einen Teil des magnetischen Flusses und daher auch nur einen Teil der Signalenergie zum SQUID. Oder es erfolgt, insbesondere bei sehr kleinen Proben, eine direkte Kopplung dadurch, daß die Probe direkt in der SQUID-Schleife plaziert wird. Damit kann ein Verlust magnetischen Flusses verringert werden. Eine derartige Anordnung ist u.a. in der Patentschrift US 4588947.1 beschrieben. Das Magnetisierungsfeld wird in beiden Fällen durch eine separate supraleitende Spule erzeugt, in die ein sogenannter Erregerstrom oder Magnetisierungsstrom eingepreßt wird.

Aufgabenstellung

[0003] Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, eine konstruktiv einfache Lösung anzugeben, bei der zugleich auch die Verluste des magnetischen Flusses minimiert sind.

[0004] Diese Aufgabe wird durch eine SQUID-Anordnung nach Anspruch 1 gelöst. Danach ist es vorgesehen, daß die SQUID-Anordnung zum Messen einer Änderung eines Magnetfeldes, wobei die Änderung des Magnetfeldes durch eine in einem Magnetisierungsfeld angeordnete Probe hervorgerufen wird, ein Gleichstrom-SQUID aufweist und der SQUID selbst zum Erzeugen des Magnetisierungsfeldes ausgebildet ist.

[0005] Darüber hinaus wird diese Aufgabe durch ein Verfahren nach Anspruch 4 gelöst. Danach ist es bei einer SQUID-Anordnung mit einem Gleichstrom-SQUID zum Messen einer Änderung eines

Magnetfeldes, wobei die Änderung des Magnetfeldes durch eine in einem Magnetisierungsfeld angeordnete Probe hervorgerufen wird, vorgesehen, daß das Magnetisierungsfeld durch den SQUID selbst erzeugt wird.

[0006] Eine grundlegende Idee der Erfindung besteht in anderen Worten in einem neuartigen SQUID-Design derart, daß die Quantisierungsschleife des SQUID einerseits als Meßkreis und andererseits zum Erzeugen des Magnetisierungsfeldes verwendet wird. Erfindungsgemäß induziert ein Strom, der in einem Teil der Quantisierungsschleife fließt, das Magnetisierungsfeld und die Änderung der Probeneigenschaften erzeugt einen magnetischen Fluß direkt im SQUID.

[0007] Mit der Erfindung wird eine Lösung geschaffen, bei der zum einen eine bessere Kopplung der Probe zum SQUID und zum anderen eine Minimierung von magnetischen Streufeldern außerhalb der Probe erreicht wird.

[0008] Von Vorteil ist weiterhin, daß die Anordnung vergleichsweise einfach aufgebaut ist und keine separate supraleitende Spule zur Erzeugung des Magnetisierungsfeldes benötigt.

[0009] Die erfindungsgemäße SQUID-Anordnung ist besonders vorteilhaft u.a. zu folgenden Zwecken einsetzbar:

- in einem Suszeptometer zum Messen der magnetischen Suszeptibilität einer Probe, insbesondere in einem Mikro-Suszeptometer zur Untersuchung kleinster Partikel,
- zum Messen der Eindringtiefe eines Magnetfeldes in eine supraleitende Probe,
- in einem magnetischen (Mikro)-Kalorimeter zur Verwendung in einem Röntgendetektor und
- in einem Bolometer, insbesondere zur Detektion von schwachen Strahlungen, als Alternative für supraleitende oder halbleitende Thermistoren des Bolometers.

[0010] Vorteilhafte Ausführungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben.

[0011] Gemäß einer ersten Ausführungsform der Erfindung weist der SQUID mindestens zwei supraleitende Stromschleifen auf derart, daß die Stromschleifen einen gemeinsamen, mit zwei Josephson-Kontakten unterbrochenen Leistungsstrang aufweisen, wobei die beiden Stromschleifen derart angeordnet sind, daß ein geschlossener supraleitender Pfad möglich ist, welcher nicht durch die Josephson-Kontakte verläuft. Hierfür sind für den Meßbetrieb zwei Stromschleifen vorzugsweise parallel zu den beiden Josephson-Kontakten geschaltet, so daß sich eine parallele Gradiometeranordnung nach Art eines Doppelgradiometers ergibt. Zum Einkoppeln

des Magnetisierungsstromes als Ringstrom sind die beiden Stromschleifen dann in Serie geschaltet, so daß sich ein (äußerer) Strompfad ergibt, der nicht durch die Josephson-Kontakte verläuft.

[0012] Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung handelt es sich bei dem Magnetisierungsstrom um einen zeitlich nicht abklingenden (persistenten) Strom, der in die Stromschleifen injiziert wird, wenn ein Teil einer Stromschleife im resistiven Zustand ist. Dies wird vorzugsweise dadurch erreicht, daß in einer der beiden Stromschleifen ein thermischer Schalter zum Unterbrechender Supraleitung vorgesehen ist. Der thermische Schalter ist vorzugsweise mit einem Heizelement verbunden, welches die Supraleitung lokal aufhebt.

[0013] Entsprechend einer weiteren Ausführungsform der Erfindung dient eine der beiden Stromschleifen zur Aufnahme der Probe, während die andere Stromschleife als Referenzschleife und zum Einkoppeln des Rückkoppelflusses dient. Die Änderung der magnetischen Eigenschaften der Probe verursacht eine Änderung der Flußverteilung zwischen den beiden Stromschleifen, wodurch ein SQUID-Signal erzeugt wird.

[0014] Ganz besonders vorteilhaft ist die Unterbringung der SQUID-Anordnung einschließlich der Probe auf einem Chip. Dadurch, und durch die direkte Ankopplung der Probe an den SQUID, lassen sich extrem kleine SQUID-Sensoren bereitstellen. Dies ist für eine kostengünstige, schnelle und problemlose Kühlung zur Aufrechterhaltung des Supraleiterbetriebs von großem Vorteil.

Ausführungsbeispiel

[0015] Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung wird nachfolgend anhand der Zeichnungen näher erläutert. Hierbei zeigt die einzige Figur eine vereinfachte schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen SQUID-Anordnung mit ihren wesentlichen Bestandteilen.

[0016] In dem dargestellten Ausführungsbeispiel ist ein SQUID-Chip **100** abgebildet, auf dessen Leiterplatte **101** die gesamte SQUID-Anordnung mit einem Gleichstrom-SQUID **1** und einer Probe **2** aufgebracht ist. Das Aufbringen erfolgt mittels einer Dünnschichttechnik, beispielsweise mittels Sputtern oder Laserablation.

[0017] Der Gleichstrom-SQUID **1** umfaßt im wesentlichen eine supraleitende Schleife, die durch zwei Stellen unterbrochen wird. Derartige schwache Stellen nennt man auch Josephson-Kontakte. Die Funktionsweise eines solchen SQUID **1** ist allgemein bekannt. Sie basiert auf dem Effekt der Flußquantisierung in supraleitenden Schleifen und dem Joseph-

son-Effekt und wird hier nicht weiter erläutert.

[0018] Der Gleichstrom-SQUID **1** in dem Ausführungsbeispiel weist eine von Josephson-Kontakten **5**, **6** unterbrochene supraleitende Stromschleife **3** mit einer Spule L1 auf. Parallel zu dieser Spule L1 ist eine weitere Spule L2 angeschlossen, welche die Stromschleife **4** bildet, die auch mit den Josephson-Kontakten **5**, **6** unterbrochen ist. Die Schleifen **3** und **4** bilden anders ausgedrückt die Quantisierungsschleifen des SQUID **1**.

[0019] Die Stromschleifen **3**, **4** sind derart zueinander angeordnet, daß ein geschlossener supraleitender Pfad möglich ist, welcher nicht durch die Josephson-Kontakte **5**, **6** verläuft. Die Anordnung erfolgt dabei insbesondere derart, daß die beiden Stromschleifen **3**, **4** zu den Josephson-Kontakten **5**, **6** gefaltet sind. Dadurch ergibt sich ein Leitungsstrang **19**, der von beiden Stromkreisen **3**, **4** gemeinsam nutzbar ist und auf dem die beiden Josephson-Kontakte **5**, **6** angeordnet sind. Zum Einkoppeln eines Magnetisierungsstromes I als Ringstrom sind die beiden Stromschleifen **3**, **4** in Serie zusammengeschaltet, so daß sich ein äußerer Strompfad ergibt, der nicht durch die Josephson-Kontakte **5**, **6** verläuft.

[0020] Die sich aus den beiden Stromschleifen **3**, **4** ergebende Quantisierungsschleife des SQUID **1** wird somit einerseits als Meßkreis und andererseits zum Erzeugen des Magnetisierungsfeldes verwendet.

[0021] Bei dem Magnetisierungsstrom I handelt es sich um einen persistenten Strom, der in die Stromschleifen **3**, **4** eingekoppelt wird, wenn ein Teil der Stromschleife **4** in einem resistiven Zustand ist. Diese Unterbrechung der Supraleitung wird in dem gezeigten Ausführungsbeispiel dadurch erreicht, daß in Stromschleife **4** ein thermischer Schalter **7** zum Unterbrechender der Supraleitung vorgesehen ist. Der thermische Schalter **7** ist zwischen der Spule L2 und dem gemeinsamen Leitungsstrang **19** der beiden Stromschleifen **3**, **4** angeordnet. Der thermische Schalter **7** weist ein Heizelement **9** auf und ist durch dieses Heizelement aktivierbar derart, daß es zu einer Aufhebung der Supraleitung kommt. Das Heizelement **9** ist an Anschlußleitungen **17** angeschlossen und über Anschlußkontakte **18** mit einer Steuereinheit des SQUID **1** (nicht abgebildet) verbunden.

[0022] Das Einkoppeln des Magnetisierungsstromes I erfolgt über zu beiden Seiten des thermischen Schalters **7** an die Stromschleife **4** angeschlossene Einspeiseleitungen **13**, die über Anschlußkontakte **14** mit einer entsprechenden Stromquelle (nicht abgebildet) verbunden sind. Nach dem Einkoppeln wird das Heizelement **9** deaktiviert und die Supraleitung wieder hergestellt. Die externe Stromquelle ist über ein entsprechendes Anschlußkabel (nicht abgebildet) mit dem Anschlußkontakten **14** des SQUID-Chips **100**

verbunden.

[0023] Die Stromschleife **3** dient zur Aufnahme der Probe **2**, d.h. die Probe befindet sich direkt im Inneren dieser Stromschleife **3**, während die andere Stromschleife **4** als Referenzschleife und zum Einkoppeln des Rückkoppelflusses und damit zum Betreiben der Flußregelschleife des SQUID dient. Die Einkopplung des Rückkoppelflusses erfolgt mit Hilfe einer ebenfalls auf dem SQUID-Chip **101** angeordneten Rückkoppel- oder Kompensationsspule **8**. Die Rückkoppelspule **8** ist an Anschlußleitungen **15** angeschlossen und über Anschlußkontakte **16** mit einer Steuereinheit (nicht abgebildet) des SQUID **1** verbunden. Die Steuereinheit ist extern angeordnet und über Anschlußleitungen (nicht abgebildet) mit den Anschlußkontakten **16** verbunden.

[0024] Eine Änderung der magnetischen Eigenschaften der Probe **2**, beispielsweise aufgrund einer Temperaturänderung infolge der Absorption eines Röntgenquants, verursacht eine Änderung der Flußverteilung zwischen den beiden Stromschleifen **3, 4**, wodurch ein SQUID-Signal erzeugt wird. Der Abgriff der SQUID-Signale erfolgt über eine Anschlußleitung **10** an der zweiten Spule L2 einerseits und über eine zwischen den beiden Josephson-Kontakten **5, 6** an dem gemeinsamen Leistungsstrang **19** angeschlossene Anschlußleitung **11** andererseits. An den beiden Anschlußleitungen **10, 11** ist über die Anschlußkontakte **12** die Auswerteeinheit (nicht abgebildet) des SQUID **1** angeschlossen. Die Auswerteeinheit ist extern angeordnet und über Anschlußleitungen (nicht abgebildet) mit den Anschlußkontakten **12** verbunden.

[0025] Die zuletzt beschriebene Ausführung kann beispielsweise bei einer paramagnetischen Probe angewendet werden, wenn der SQUID-Chip **100** in einem magnetischen Kalorimeter zur Verwendung in einen Röntgendetektor eingesetzt wird.

Bezugszeichenliste

1	Gleichstrom-SQUID
2	Probe
3	erste Stromschleife
4	zweite Stromschleife
5	erster Josephson-Kontakt
6	zweiter Josephson-Kontakt
7	thermischer Schalter
8	Rückkoppelspule
9	Heizer
10	Anschlußleitung
11	Anschlußleitung
12	Anschlußkontakt
13	Einspeiseleitung
14	Anschlußkontakt

15	Anschlußleitung
16	Anschlußkontakt
17	Anschlußleitung
18	Anschlußkontakt
19	Gemeinsamer Leistungsstrang
100	SQUID-Chip
101	Leiterplatte

Patentansprüche

1. SQUID-Anordnung zum Messen einer Änderung eines Magnetfeldes mit einem Gleichstrom-SQUID (**1**), wobei die Änderung des Magnetfeldes durch eine Probe (**2**) hervorgerufen wird, welche in einem Magnetisierungsfeld angeordnet ist, **dadurch gekennzeichnet**, daß der SQUID (**1**) selbst ausgebildet ist zum Erzeugen des Magnetisierungsfeldes.

2. SQUID-Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der SQUID (**1**) mindestens zwei supraleitende Stromschleifen (**3, 4**) aufweist derart, daß die Stromschleifen (**3, 4**) einen gemeinsamen, mit zwei Josephson-Kontakten (**5, 6**) unterbrochenen Leistungsstrang (**19**) aufweisen, und wobei die Stromschleifen (**3, 4**) derart angeordnet sind, daß ein geschlossener supraleitender Pfad möglich ist, welcher nicht durch die Josephson-Kontakte (**5, 6**) verläuft.

3. SQUID-Anordnung nach Anspruch 2, gekennzeichnet durch einen thermischen Schalter (**7**) in einer der Stromschleifen (**3, 4**) zum Unterbrechen der Supraleitung für ein Einprägen eines Magnetisierungsstromes (I) in den geschlossenen supraleitenden Pfad.

4. SQUID-Anordnung nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Probe (**2**) in einer der Stromschleifen (**3**) angeordnet ist, während die andere Stromschleife (**4**) als Referenzschleife und zum Einkoppeln des Rückkoppelflusses dient.

5. Verfahren zum Messen einer Änderung eines Magnetfeldes mit einer SQUID-Anordnung, wobei die SQUID-Anordnung ein Gleichstrom-SQUID (**1**) aufweist und wobei die Änderung des Magnetfeldes durch eine Probe (**2**) hervorgerufen wird, welche in einem Magnetisierungsfeld angeordnet ist, dadurch gekennzeichnet, daß das Magnetisierungsfeld durch den SQUID (**1**) selbst erzeugt wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei der SQUID (**1**) mindestens zwei supraleitende Stromschleifen (**3, 4**) aufweist derart, daß die Stromschleifen (**3, 4**) einen gemeinsamen, mit zwei Josephson-Kontakten (**5, 6**) unterbrochenen Leistungsstrang (**19**) aufweisen, und wobei die Stromschleifen (**3, 4**) derart angeordnet sind, daß ein geschlossener supraleitender Pfad möglich ist, welcher nicht durch die Joseph-

son-Kontakte (5, 6) verläuft, gekennzeichnet durch ein Unterbrechen der Supraleitung für ein Einprägen eines Magnetisierungsstromes (I) in den geschlossenen supraleitenden Pfad durch einen thermischen Schalter (7) in einer der beiden Stromschleifen (3, 4).

7. Verwendung einer SQUID-Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 4 oder eines Verfahrens nach den Ansprüchen 5 oder 6 in einem Suszeptometer zum Messen der magnetischen Suszeptibilität einer Probe oder in einem Mikro-Suszeptometer zur Untersuchung kleinster Partikel.

8. Verwendung einer SQUID-Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 4 oder eines Verfahrens nach den Ansprüchen 5 oder 6 zum Messen der Eindringtiefe eines Magnetfeldes in eine supraleitende Probe.

9. Verwendung einer SQUID-Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 4 oder eines Verfahrens nach den Ansprüchen 5 oder 6 in einem magnetischen Kalorimeter oder Mikro-Kalorimeter zur Verwendung in einem Röntgendetektor.

10. Verwendung einer SQUID-Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 4 oder eines Verfahrens nach den Ansprüchen 5 oder 6 in einem Bolometer oder zur Detektion von schwachen Strahlungen, als Alternative für supraleitende oder halbleitende Thermistoren des Bolometers.

Es folgt ein Blatt Zeichnungen

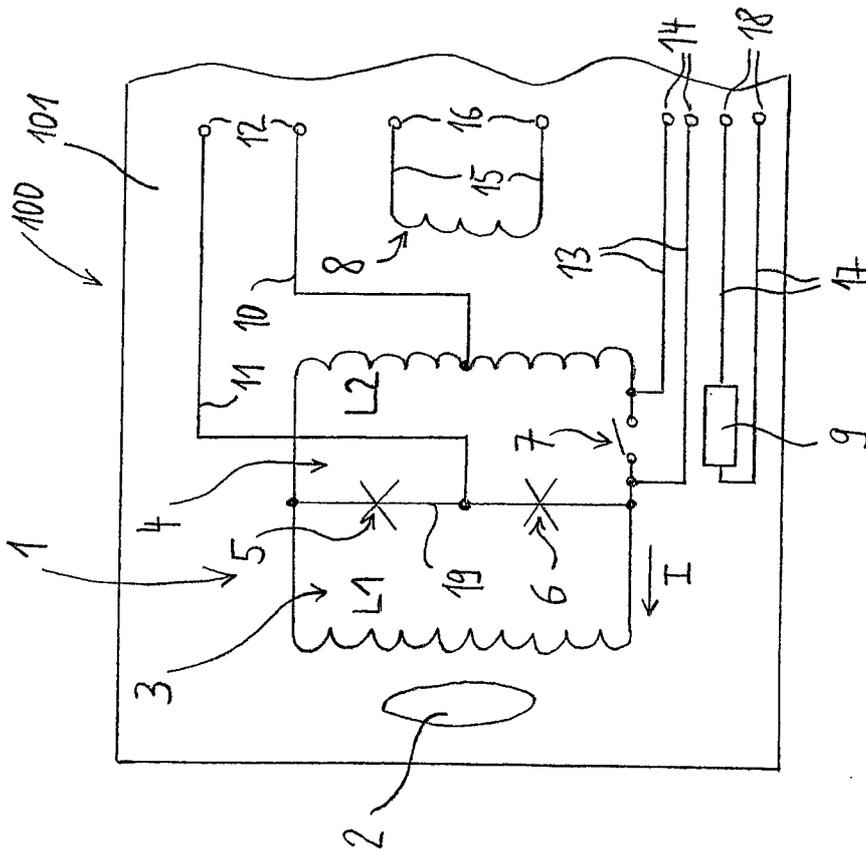


Fig. 1